

УДК 517.977.57:621.9202

А.А. Симонова, канд. техн. наук, Кременчук, Україна

ОЦІНКА ЦИКЛІЧНОЇ МІЦНОСТІ СУБМІКРОКРИСТАЛІЧНОЇ СТАЛІ СТ20

Розглянуто методи визначення циклічної міцності. Отримано експериментальні значення та побудовано криві втоми для субмікросталі сталі Ст20, що отримана методом всебічного кування, а також після механічної обробки із різними режимами різання. Запропоновано алгоритм для побудови діаграми граничних напружень у ППП ANSYS Workbench, який дозволяє робити оцінку опору втомі для циклів з різними коефіцієнтами асиметрії.

Ключові слова: циклічна міцність, граничні напруження

Рассмотрены методы определения циклической прочности. Получены экспериментальные значения и построены кривые усталости для субмикрокристаллической стали Ст20, а также после механической обработки с разными режимами резания. Предложен алгоритм для построения диаграммы граничных напряжений в ППП ANSYS Workbench, который позволяет делать оценку сопротивлению усталости для циклов с различными коэффициентами асимметрии.

Ключевые слова: циклическая прочность, граничные напряжения

The methods for determining the cyclic strength are considered. The experimental values have been obtained and fatigue curves for ultrafine-grained St20 steel have been constructed, as well as after machining with different cutting conditions. An algorithm is proposed for constructing the boundary stresses diagram in the ANSYS Workbench, which makes it possible to estimate the fatigue resistance for cycles with different asymmetry coefficients.

Keywords: cyclic strength, boundary stresses

Останні роки ознаменувалися зростаючим інтересом до субмікро- і нанокристалічних металів і сплавів, які відрізняються високими фізико-механічними властивостями.

Зазначені поєднання фізико-механічних властивостей припускають можливе використання виробів з субмікро- і нанокристалічних металів для ракетної та авіаційної техніки, автомобільного виробництва, медицини та ін.

В об'ємних заготовках формується субмікро- або нанокристалічна структура, що складається із зерен, розділених переважно нерівноважними високоенергетичними кордонами. При дії високих температур інтенсифікуються процеси рекристалізації, оскільки структура субмікро- і нанокристалічних металів є термічно нестабільний [1].

При виготовленні виробів, як правило, застосовують механічну обробку. Механічна обробка супроводжується значними пластичними деформаціями і високою температурою різання. Відзначені умови призводять до повернення структури металу в крупнокристалічний стан і втрати вихідних високих фізико-механічних властивостей [2, 3].

Однак, єдиної залежності у властивостях матеріалів, схильних до інтенсивної пластичної деформацією немає, тому що збільшення опору деформаціям може негативно позначитися на пружних характеристиках матеріалів. Тому на сьогоднішній день дослідження механічних властивостей матеріалу після інтенсивної пластичної деформації та механічної обробки є актуальною темою.

Підвищення характеристик міцності високоміцних матеріалів може бути досягнуто за рахунок зменшення розмірів зерна (зернограничного зміцнення) і формування субструктури (субструктурне зміцнення). Ефективним способом поліпшення міцності є методи інтенсивної пластичної деформації (ІПД) [1].

В роботі [4] було доведено, що ІПД істотно підвищує властивості міцності титану і його сплавів.

Зразки нержавіючої сталі після ІПД має великий запас витривалості. У межах $10^3 - 10^7$ циклів запас витривалості вище на ~ 100 МПа порівняно з матеріалом без субмікро структури. Найбільше значення границі витривалості матеріалу після ІПД порядку 800 МПа при частоті циклів $6 \cdot 10^4$, при цьому спостерігається швидке падіння витривалості (від 800 МПа до 500 МПа) [5]. Можна зробити висновок, що матеріал X18H10T з субмікрокристалічною структурою в діапазоні $10^3 - 10^7$ циклів навантаження має підвищеними характеристиками міцності.

Представлені експериментальні роботи показали реальну можливість створення нових високоміцних матеріалів на основі крупнокристалічних матеріалів.

Термічно нестабільний стан НК та СМК структури може призвести до зниження фізико-механічних та експлуатаційних характеристик даного класу матеріалів при механічній обробці. Тому важливе значення має вивчення оброблюваності металів із СМК структурою та впливу параметрів процесу різання на зміну експлуатаційних характеристик, у тому числі циклічної міцності.

В якості досліджуваного матеріалу обрана низько вуглецева Сталь 20 (Fe – 0,22C) у вихідному крупнокристалічному стані – прокат – діаметр 20,4 мм, довжина 100,2 мм. Отримання субмікрокристалічного стану здійснювалося методом всебічного кування, що включає в себе етапи осадки і протягування [1]. Розміри заготовки після ІПД діаметр 14,6 мм, довжина 177 мм.

Процес всебічного кування виконувався при нагріванні заготовки в індукційній печі. Після чотирьох проходів, що включають в себе операції осадки – протягування, отримані поковки охолоджували в сухому піску.

Досліджувані зразки, отримані на підприємстві ПАТ КрКЗ, м. Кременчук (Україна), по раніше розглянутої технології.

Експериментальні дослідження оброблюваності проводили на зразках з крупнокристалічною (КК) і субмікрокристалічною (СМК) структурою.

Для дослідження впливу механічної обробки використовувались різні режими різання: $v = 30 - 130$ м/хв, $s = 0,2 \div 0,5$ мм / об. Використовувалася

постійна глибина різання $t = 0,5$ мм. Процес різання здійснювався без охолодження.

В якості ріжучого інструменту використовувався токарний прохідний різець зі змінними багатогранними твердосплавними пластинами CNMG 120404-MF1, TS2000 фірми SECO. Геометричні параметри: передній кут – 5° , задній кут – 0° , радіус округлення вершини леза – 0,4 мм. Експерименти проводили на токарному верстаті моделі H.Ernault-Somua Cholet 435.

Основними критеріями руйнування при визначенні границь витривалості і побудові кривих втоми є повне руйнування або поява макротріщин заданого розміру. Випробування проводять на лабораторних зразках малого діаметра (7–10 мм), виготовлених з прутка. Поверхня зразків ретельно полірують [6].

Далі проводять серію випробувань зразків при вигині симетричним циклом навантаження (вигин симетричним циклом найбільш легко реалізувати). У першому випробуванні прикладають величину навантаження, яка створює максимальне напруження циклу, за значенням близькі до границі текучості. Заміряють кількість циклів навантаження, які зразок витримав до руйнування. Зменшують навантаження і проводять наступне випробування, заміряють кількість циклів навантаження, які зразок витримав до руйнування. І так поетапно навантаження знижують, поки зразок не витримає без руйнування базове число циклів навантаження (10^7 циклів) [6].

Результати кожного випробування наносять на графік, де по осі абсцис (X) відкладають кількість циклів, яке витримав зразок, а по осі ординат (Y) – максимальні напружень циклу. Отримана крива називається кривою втоми (інші назви "крива Велера", "крива Напруга-Цикл"). Вона може будуватися в координатах σ -N (лінійні координати), σ -lgN (напівлогарифмічні координати), lg σ -lgN (логарифмічні координати).

В якості критерію оцінки опору втоми використовується границя витривалості. Її значення для кожної сталі різні, з ними можна ознайомитись в довідкових посібниках і технічних характеристиках сталей.

Оцінка міцності виробу від дії циклічного навантаження зводиться до порівняння значень отриманих розрахункових напруг і значення границі витривалості сталі, з якої виріб виготовлений. Такий підхід не завжди коректний.

У довідковій літературі і технічних характеристиках сталі границя витривалості позначений як σ_{-1} . Саме позначення σ_{-1} говорить про те, що наведена величина нормального напруження, що виникає при симетричному циклі навантаження при випробуваннях, що проводять на лабораторних зразках малого діаметра (7–10 мм), виготовлених з прутка.

Отже, у виробах іншої конструкції, розмірів, і при інших випадках циклічного навантаження користуватися значенням σ_{-1} некоректно. На підставі вищевикладеного справедливо вважати, що межа витривалості не є достатнім критерієм для оцінки опірності металу.

Існує більш інформативний критерій, що характеризує опір металу до дії циклічних навантажень – діаграма граничних відхилень для різних асиметрій

циклу [6]. Побудова діаграма граничних відхилень для СМК сталі після механічної обробки з різними режимами різання буде розглянуто у цьому розділі.

На рис. 1 наведено експериментально отримані криві втоми для КК та СМК Сталі 20.

Як видно з рис. 1, крива асимптотична наближається до горизонтальної лінії. Ордината цієї асимптоти і є границя витривалості, тобто найбільше напруження циклу, при якому руйнування матеріалу ніколи не відбудеться.

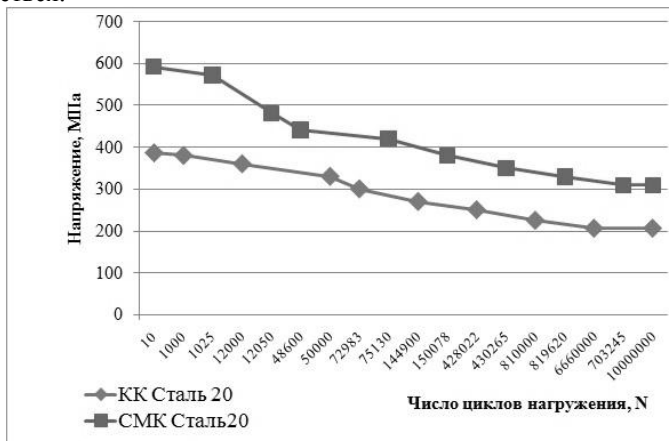


Рисунок 1 – Криві втоми Сталі 20 в лінійних координатах

Таким чином, запис $\sigma_{-1} = 206$ МПа для Сталі 20 у крупнокристалічному стані означає, що це найбільше нормальне напруження, при якому не зруйнується пруток малого діаметра зі шліфованою поверхнею при дії згинального напруження в симетричному циклі. З рисунка видно, що зразки сталі після ПД мають великий запас витривалості. У межах $10^3 - 10^7$ циклів запас витривалості вище на ~ 100 МПа порівняно з матеріалом без субмікро структури. Найбільше значення границі витривалості матеріалу після ПД порядку 700 МПа при частоті циклів $6 \cdot 10^4$. Можна зробити висновок, що Сталь 20 з субмікрокристалічною структурою в діапазоні $10^3 - 10^7$ циклів навантаження має підвищеними характеристиками міцності.

Аналогічно були побудовані криві втоми для СМК Сталі 20 після її обробки із різними режимами різання (рис. 2).

Отримані результати показали, що механічна обробка негативно впливає на границю витривалості сталі з СМК структурою. Умови обробки, що мають низькі величини подачі та швидкості різання дозволяють зберегти значення границі витривалості на високому рівні у порівнянні із механічною обробкою зі швидкістю 130 м/хв та подачею 0,5 мм/об.

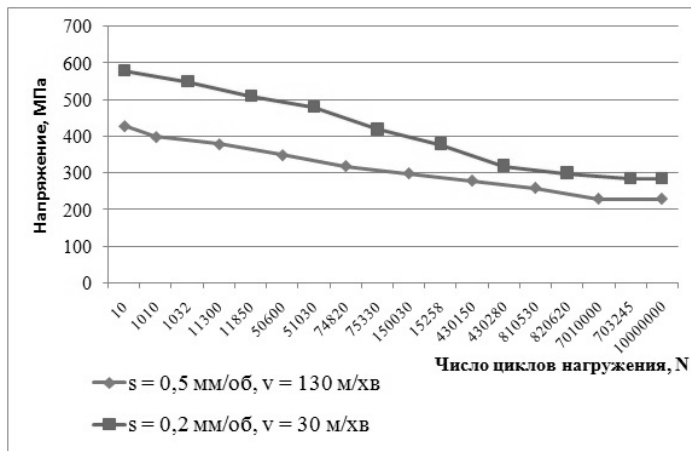


Рисунок 2 – Крива втоми Сталі 20 з СМК структурою після механічної обробки

Однак отриманні дані коректні лише для зразків малих діаметрів та при симетричному навантаженні. Для дослідження інших випадків циклічного навантаження та у виробках іншої конструкції та розмірів буде побудовано діаграма граничних відхилень.

Для побудови діаграми граничних напружень в якості деталі обраний важіль приводного пристрою візка вагона метро (рис. 3). Ця деталь передає тягове навантаження від візка на кузов вагона і в процесі експлуатації підлягає наступним циклічним навантаженням: розтягнення–стиснення і вигин.

У даній статті буде розглянуто циклічне згинальне навантаження. Для отримання значень, необхідних для побудови діаграми використаний ППП ANSYS Workbench [7].

1. На першому етапі проведені втомні випробування важеля і побудована крива втомної міцності.

2. У ППП ANSYS Workbench створюємо матеріал з необхідними властивостями.

Для завдання матеріалу необхідно задати щільність, модуль пружності і коефіцієнт Пуассона. Значення щільності й інших параметрів для крупнокристалічної сталі беремо з довідкової літератури [8], для субмікрокристалічних зразків з роботи [9]. Температуру, якій відповідає ця щільність, вказувати необов'язково. Модуль **Engineering Data** розуміє завдання будь-якого параметра у вигляді таблиці і ілюструє у вигляді графіка. Якщо значення тільки одне, на графіку відображається одна точка.

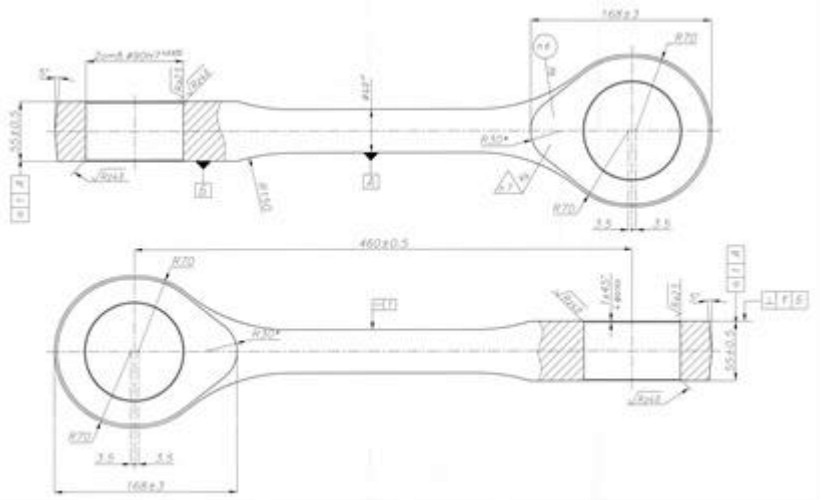


Рисунок 3 – Важіль приводного пристрою

Наступну властивість додаємо з набору опцій **Linear Elastic** (Лінійні пружні). Сталь ізотропна, тому вибираємо властивість **Isotropic Elasticity** (ізотропна пружність). Необхідно заповнити наступні поля: модуль Юнга (**Young's Modulus**) і коефіцієнт Пуассона (**Poisson's Ratio**). Поля **Bulk Modulus** і **Shear Modulus** заповняться автоматично.

Остання опція необхідна саме для втомних розрахунків. Це **Alternating Stress Mean Stress** з набору опцій **Life**.

На цьому етапі задаємо криву втоми. У вікні **Table of Properties Row 9: Alternating Stress Mean Stress** вводимо значення з рис. 1 та рис. 2 даної роботи. В стовпці **B** цикли, в стовпці **C** напруги, ім відповідні. У стовпці **A** вказується середня напруга циклу для отриманої експериментально кривої втоми. Як вже вказували раніше, криву втоми отримували для симетричного циклу навантаження, тобто $\sigma_m = 0$. Для нашого завдання заведено досить властивостей.

3. Розрахунки в ANSYS проводяться методом скінчених елементів. Так що далі необхідно згенерувати сітку скінчених елементів на моделі. Для цього натискаємо правою кнопкою миші на об'єкті **Mesh**, з контекстного меню вибираємо **Insert - Sizing**. Необхідно вказати розмір кінцевого елемента. У вікні **Details** натискаємо на клітинку поруч з **Element size** і вказуємо розмір елемента 5 мм. в контекстному меню вибираємо **Generate Mesh**. Після генерації модель буде виглядати так.

4. Тепер необхідно накласти закріплення та навантаження.

Деталь жорстко закріплена за одну провущину. Цю схему закріплення реалізуємо за допомогою команди **Fixed Support**. Для цього натискаємо

правою кнопкою миші на об'єкті **Static structural**, з контекстного меню вибираємо **Insert - Fixed Support**.

5. Запускаємо розрахунок. Після завершення роботи вибираємо вид результату. Нас цікавлять загальні напруги, які виникають в конструкції. Для цього правою кнопкою натискаємо на об'єкті **Solution** і в контекстному меню вибираємо **Stress - Equivalent**.

Отримані напруги близькі до межі витривалості даної сталі (206МПа).

6. Переходимо до отримання даних для побудови діаграми граничних напружень. Вона буде побудована по серії точок. Перша точка - це межа витривалості сталі при симетричному циклі навантаження. Отже вона матиме на графіку координати $(0; \sigma_{-1})$. Остання точка діаграми - межа міцності, вона матиме координати $(\sigma_B; \sigma_B)$. Нам необхідно отримати точки між ними. Це будуть межі витривалості для циклів навантаження з коефіцієнтами асиметрії від -1 до +1.

Для отримання меж витривалості необхідно повторити розрахунок з різними величинами навантаження. Щоб заощадити час скористаємося інструментом **Solution Combination**. Для цього натискаємо правою кнопкою на об'єкті **Model** і в контекстному меню вибираємо **Insert-Solution Combination**.

У стовпці **Coefficient** знаходиться масштабний коефіцієнт. На нього множиться значення результату, отриманого в розрахунку. Такий метод розрахунку дає ті ж результати, що і зміна значення навантаження, але займає значно менше часу. Решта точок можна отримати аналогічно.

В результаті розрахунків отримано ряд точок за якими будуються діаграми граничних напружень (рис. 4).

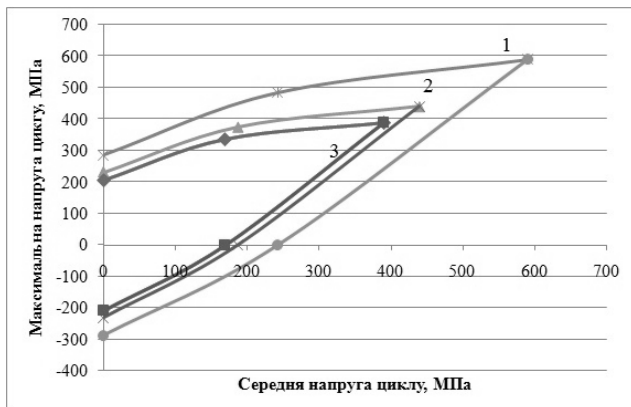


Рисунок 4 – Діаграми граничних напружень:

- 1 – для субмікрокристалічного зразка з режимами обробки ($s=0,2\text{мм/об}$, $v=30\text{м/мин}$);
- 2 – для субмікрокристалічного зразка з режимами обробки ($s=0,5\text{мм/об}$, $v=130\text{м/мин}$);
- 3 – для крупнокристалічного зразка

Діаграми граничних напружень будується в координатах середньої напруженності циклу (вісь X) і максимального напруження циклу (вісь Y) і дозволяє виконати оцінку опору втомі майбутнього виробу на етапі проектування. Достатньо знати такі характеристики циклу: середнє напруження циклу σ_m і найбільше напруження циклу σ_{\max} .

Оцінка опору втомі виконується таким чином: на діаграмі будується точка, координатами якої є середнє і максимальне напруження циклу. Якщо точка опиниться в області, обмеженої кривими σ_{\max} і σ_{\min} , то втомного руйнування майбутнього виробу протягом встановленого терміну служби не відбудеться.

Для крупнокристалічного зразка маємо наступні точки: точка 1 – з координатами (0; 206,99), точка 2 – (168,7; 337,4), точка 3 – (390; 390), точка 4 – (0; -206,99), точка 5 – (168,7; 0). Для субмікроструктурного зразка з режимами обробки ($s=0,2\text{мм/об}$, $v=30\text{м/мин}$): точка 1 – з координатами (0; 286,98), точка 2 – (242,5; 485), точка 3 – (590; 590), точка 4 – (0; -286,98), точка 5 – (242,5; 0). Для субмікроструктурного зразка з режимами обробки ($s=0,5\text{мм/об}$, $v=130\text{м/мин}$): точка 1 – з координатами (0; 231,28), точка 2 – (187,34; 374,67), точка 3 – (440; 440), точка 4 – (0; -231,28), точка 5 – (187,34; 0).

Дана діаграма дозволяє робити оцінку опору втомі для циклів з різними коефіцієнтами асиметрії, тобто вона охоплює всі розглянуті раніше види циклів навантаження. Враховуючи те, що конфігурація і розміри роблять значний вплив на опір втомі, в даній роботі пропонується одержати діаграму граничних напружень на типовій деталі. Отримана діаграма допоможе проводити оцінку опору втомі при проектуванні виробів подібної конструкції і розмірів.

Порівняння отриманих діаграм для різної структури Сталі 20 показало значне зростання максимального навантаження та середнього навантаження циклу яке може витримати Сталь 20 у субмікроструктуралічному стані після механічної обробки з низькими режимами різання. Таким чином субмікроструктурованою низьковуглецевою сталлю можливо замінити більш дорогі леговані сталі та виготовляти більш відповідальні деталі машин.

Висновки:

Експериментально отримано криві втомі для крупнокристалічного зразка Сталі 20 та для Сталі 20 у субмікроструктуралічному стані. Результати показали, що Сталь 20 з субмікроструктурною структурою в діапазоні $10^3 - 10^7$ циклів навантаження має підвищені характеристики міцності. Механічна обробка негативно впливає на границю витривалості сталі з СМК структурою. Умови обробки, що мають низькі величини подачі та швидкості різання дозволяють зберегти значення границі витривалості на високому рівні у порівнянні із механічною обробкою зі швидкістю 130 м/хв та подачею 0,5 мм/об.

Створено алгоритм побудови діаграми граничних напружень у ППП ANSYS Workbench. Дана діаграма дозволяє робити оцінку опору втомі для циклів з різними коефіцієнтами асиметрії, тобто вона охоплює симетричний, пульсуючий та асиметричний цикли, що є найпоширенішими навантаженнями у машинобудуванні.

Список використаних джерел: 1. *Валиев Р.З.* Наноструктурные материалы, полученные методом интенсивной пластической деформацией / *Р.З. Валиев, И.В. Александров.* – М.: Логос, 2000. – 272 с. 2. *Verezub N.V.* The management of surface quality of metal with nano and submicrocrystalline structure during machining / *N.V. Verezub, G. Kaptay, A.A. Symonova* // Сучасні технології в машинобудуванні = Modern technologies in mechanical engineering : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2010. – Вип. 5. – С. 244-249. 3. *Гребченко А.И.* Резание металлов с объемной нано- и субмикроструктурной структурой: монография / *А.И. Гребченко, Дж. Кантай, А.А. Симонова и др.* – Х.: «Точка», 2012. – 217с. 4. *Терентьев В.Ф.* Циклическая прочность субмикро- и нанокристаллических металлов и сплавов / *В.Ф. Терентьев* // Нові матеріали та технології в металургії та машинобудуванні, 2010. – №1. – С. 9-24. 5. *Юркова А.И.* Механические свойства наноструктурного железа, полученного интенсивной пластической деформацией / *А.И. Юркова, А.В. Белоцкий, А.В. Бякова, Ю.В. Мильман* // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии: збірник наукових праць, 2009. – Т.7, вип.2. – С. 619-632. 6. *Serensen S.B.* Несущая способность и расчет деталей машин на прочность / *С.В. Серенсен, В.П. Козаев, Р.М. Шнейдерович.* – М.: Машиностроение, 1985. – 488с. 7. *ANSYS в примерах и задачах / Под общ. ред. Д.Г. Красковского.* – М.: КомпьютерПресс, 2002. – 224с. 8. *Марочник сталей и сплавов / Под общ. ред. А.С.Зубченко.* – М.: Машиностроение, 2003. – 784с. 9. *Скороход В.В.* Фізико-хімічна кінетика в наноструктурних системах / *В.В. Скороход, І.В. Уварова, А.В. Рагуля.* – К.: Академперіодика, 2001. – 180с.

Bibliography (transliterated): 1. *Valiev R.Z.* Nanostrukturnye materialy, poluchennyye metodom intensivnoy plasticheskoy deformatsiy / *R.Z. Valiev, I.V. Aleksandrov.* – М.: Logos, 2000. – 272 s. 2. *Verezub N.V.* The management of surface quality of metal with nano and submicrocrystalline structure during machining / *N.V. Verezub, G. Kaptay, A.A. Symonova* // Suchasni tekhnologiyi v mashynobuduvanni: zb. nauk. praczh. – Harkiv: NTU «XPI», 2011. – vy'p.6. – S. 40-51. 3. *Grabchenko A.I.* Rezanie metallov s ob'mnoy nano- i submikrokristallicheskoj strukturoj: monografiya / *A.I. Grabchenko, J. Kaptay, A.A. Symonova i dr.* – H.: «Tochka», 2012. – 217s. 4. *Terentev V.F.* Tsiklicheskaya prochnost submikro- i nanokristallicheskih metallov i splovov / *V.F. Terentev* // Novi materialy ta tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni, 2010. – №1. – S. 9-24. 5. *Yurkova A.I.* Mehanicheskie svoystva nanostrukturnogo zheleza, poluchenogo intensivnoy plasticheskoy deformatsiy / *A.I. Yurkova, A.V. Belotskiy, A.V. Byakova, Yu.V. Milman* // Nanosistemy, nanomaterialy, nanotehnologii: zblnrnik naukovih prats., 2009. – T.7, vyip.2. – S. 619-632. 6. *Serensen S.V.* Nesuschaya sposobnost i raschet detaley mashin na prochnost / *S.V. Serensen, V.P. Kogaev, R.M. Shneyderovich.* – М.: Mashinostroenie, 1985. – 488s. 7. *ANSYS v primereh i zadachah / Pod obsch. red. D.G. Kraskovskogo.* – М.: KompyuterPress, 2002. – 224 s. 8. *Marochnik staley i splovov / Pod obsch. red. A.S.Zubchenko.* – М.: Mashinostroenie, 2003. – 784 s. 9. *Skorohod V.V.* Fiziko-himichna klnetika v nanostrukturnih sistemah / *V.V. Skorohod, I.V. Uvarova, A.V. Ragulya.* – К.: Akademperiodika, 2001. – 180 s.